

de l'histoire galactique. Statistiquement, le nombre de civilisations présentes à un moment donné est égal à la fréquence d'apparition multipliée par leur durée de vie moyenne. On estime la fréquence d'apparition des civilisations galactiques en considérant qu'elle est égale au nombre total de civilisations qui sont apparues divisé par l'âge de la Galaxie, c'est-à-dire environ 12 milliards d'années. Si les civilisations apparaissent à un rythme régulier et si elles vivent en moyenne 1 000 ans chacune, 12 milliards de civilisations techniques ont dû se développer dans toute l'histoire de la Galaxie pour qu'on en compte 1 000 aujourd'hui. En modifiant les hypothèses sur la fréquence de formation et sur la durée de vie moyenne, on détermine des nombres différents de civilisations, mais ils restent très grands. Comment aucune de ces milliards de civilisations n'aurait-elle laissé de preuve de son existence ?

La migration extraterrestre

Ce problème a été examiné en 1975 par l'astronome Michael Hart et par l'ingénieur David Viewing. Il a ensuite été approfondi, notamment par le physicien Frank Tipler et par le radioastronome Ronald Bracewell. Tous considèrent qu'il n'existe aucune preuve claire de visites extraterrestres sur la Terre ; en tout cas, la Terre n'a jamais été colonisée par une civilisation extraterrestre, car elle aurait bloqué notre propre évolution et nous ne serions pas là pour en parler.

Comment concilier l'absence de signes extraterrestres avec l'idée d'un grand nombre de civilisations avancées ? Quatre possibilités ont été évoquées : les vols spatiaux interstellaires sont techniquement impossibles ; les civilisations extraterrestres explorent activement la Galaxie, mais ne sont pas encore parvenues jusqu'à nous ; le

voyage interstellaire est possible, mais les extraterrestres ont choisi de ne pas l'entreprendre ; enfin, les extraterrestres sont parvenus au voisinage de la Terre, mais ils ont décidé de ne pas nous approcher. Si nous parvenons à éliminer ces quatre explications, nous devons envisager que nous sommes peut-être les formes de vie les plus évoluées de la Galaxie.

La première explication ne tient pas : aucun principe connu n'interdit les vols spatiaux interstellaires. Nous n'en sommes qu'à l'aube de l'ère spatiale, et les ingénieurs imaginent déjà des engins qui iraient à 10 ou 20 pour cent de la vitesse de la lumière : on atteindrait les étoiles les plus proches en quelques décennies (voir *Vers les étoiles*, par Stéphanie Leifer, *Pour la Science*, avril 1999).

Pour la même raison, la deuxième explication (les extraterrestres voyagent, mais ne nous ont pas trouvés)

Où se cachent-ils ?

Notre Galaxie semble dépourvue de civilisations avancées, mais des cultures moins développées pourraient avoir échappé à nos recherches.

À ce jour, personne n'a jamais détecté un signal radio envoyé par des extraterrestres. La quête commence seulement, mais l'absence de détection est déjà un résultat : les exobiologistes en déduisent le nombre maximum de civilisations qui pourraient vivre dans la Galaxie, et ils connaissent leur niveau technique.

Seules les fréquences voisines de 1,42 gigahertz ont été bien étudiées : elles correspondent à la raie d'émission de l'hydrogène, l'élément le plus répandu de l'Univers, car on suppose que des extraterrestres intelligents attireraient notre attention grâce à cette fréquence « naturelle ». Le diagramme de la page ci-contre montre le degré d'avancement des recherches de signaux extraterrestres autour de cette fréquence. Si des civilisations émettent à cette fréquence, soit elles sont hors de portée, soit elles émettent trop faiblement pour que nos instruments les détectent. Ainsi, on exclut l'existence de certains types de civilisations : des civilisations primitives (de niveau analogue à celui de la Terre) proches de la Terre, et des civilisations plus évoluées, mais plus éloignées.

Dans ce diagramme, la distance à la Terre est portée en abscisse et la puissance efficace rayonnée isotrope est en ordonnée. Cette puissance est la puissance de l'émetteur divisée par la fraction du ciel couverte par l'antenne. Dans le cas d'un émetteur omnidirectionnel, la puissance efficace rayonnée isotrope est égale à la puissance de l'émetteur. Aujourd'hui, l'émetteur le plus puissant de notre planète est le radiotélescope d'Arecibo, à Porto Rico ; s'il était utilisé comme dispositif radar à faisceau étroit, sa puissance efficace rayonnée isotrope serait de l'ordre de 10^{14} watts.

Cette puissance sert à classer le degré technique des civilisations éventuelles : au début des années 1960, Nikolaï Kardachev, le pionnier russe de la recherche de signaux extraterrestres, et le physicien américain Carl Sagan ont considéré que les civilisations de type I émettent des signaux d'une puissance équivalente à celle de toute la

lumière solaire atteignant une planète comme la Terre, soit 10^{16} watts environ ; les civilisations de type II exploiteraient toute la puissance émise par une étoile de type solaire, soit environ 10^{27} watts ; enfin, les civilisations de type III, encore plus évoluées, maîtriseraient la puissance d'une galaxie entière, soit 10^{38} watts. Des intermédiaires sont envisageables : par interpolation, on détermine que l'humanité, jugée d'après le télescope d'Arecibo, est une civilisation de type 0,7.

Pour une distance et une puissance d'émission données, le diagramme indique la proportion d'étoiles qui ont été scrutées. Les zones colorées représentent les civilisations dont nous pouvons dire avec plus ou moins de certitude qu'elles n'existent pas. La zone noire correspond aux civilisations qui auraient pu échapper aux recherches. La zone noire s'élargit sur la droite du diagramme, ce qui correspond aux grandes distances par rapport à la Terre. Les programmes de recherche de signaux extraterrestres excluent déjà la présence d'émetteurs radio équivalents au télescope d'Arecibo à moins de 50 années-lumière de la Terre. Plus loin, ils permettent d'exclure la présence des émetteurs les plus puissants. Au-delà de la Voie lactée, les programmes de recherche de signaux ne détecteront rien, car les vitesses relatives des galaxies feraient sortir les éventuels signaux de la bande de détection (plus un émetteur s'éloigne vite, plus la longueur d'onde émise est perçue allongée : c'est par cet effet Doppler que la sirène d'une ambulance qui s'éloigne paraît plus grave).

Les résultats obtenus ne sont pas des évidences. Avant de commencer leurs recherches, les exobiologistes supposaient l'existence de nombreuses civilisations de type II et III. Elles n'ont pas été trouvées. Cette conclusion confirme d'autres données astronomiques : à moins d'avoir miraculeusement contourné le deuxième principe de la thermodynamique, les «supercivilisations» devraient se débarrasser de leur surplus de chaleur, et des rayonnements infrarouges devraient être perceptibles. Or, les observations de Jun Jugaku et de ses collègues de l'Institut de recherche des civilisations, au Japon, n'ont repéré aucune émission de ce type dans un rayon de 80 années-lumière. Si

est également douteuse. Toute civilisation disposant de fusées rapides coloniserait la Galaxie entière en un temps bref à l'échelle cosmique. Considérons qu'une civilisation envoie des colons sur quelques systèmes planétaires voisins. Une fois ces colonies établies, elles partiraient fonder d'autres colonies, et ainsi de suite. Par un tel processus, le nombre de colonies croîtrait exponentiellement. Un front d'onde de colonisation se propagerait à une vitesse déterminée par la vitesse des vaisseaux et par le temps nécessaire à l'établissement de chaque colonie. D'autres colonies rempliraient rapidement le volume d'espace situé derrière ce front d'onde (voir la figure 2).

En supposant une distance entre les colonies de dix années-lumière, une vitesse de déplacement spatial égale à dix pour cent de la vitesse de la lumière, et une période de 400 ans entre

la fondation d'une colonie et l'envoi de ses propres colons vers l'extérieur, on calcule que le front d'onde de colonisation se propagerait à une vitesse moyenne de 0,02 année-lumière par an. Comme la Galaxie s'étend sur 100 000 années-lumière, cinq millions d'années suffiraient à la coloniser entièrement. Long à l'échelle humaine, ce temps ne représente que 0,05 pour cent de l'âge de la Galaxie. Par rapport aux autres échelles de temps pertinentes pour notre étude (astronomiques et biologiques), il est insignifiant. Dans les estimations précédentes, la principale incertitude concerne le temps nécessaire à une colonie pour s'établir et essaimer. Ce temps semble inférieur à 5 000 ans : c'est le temps qu'il a fallu à la civilisation humaine pour progresser, de l'ère des premières cités à l'ère spatiale. En remplaçant 400 par 5 000 dans les calculs, on obtient une colonisation complète

de la Galaxie en une cinquantaine de millions d'années.

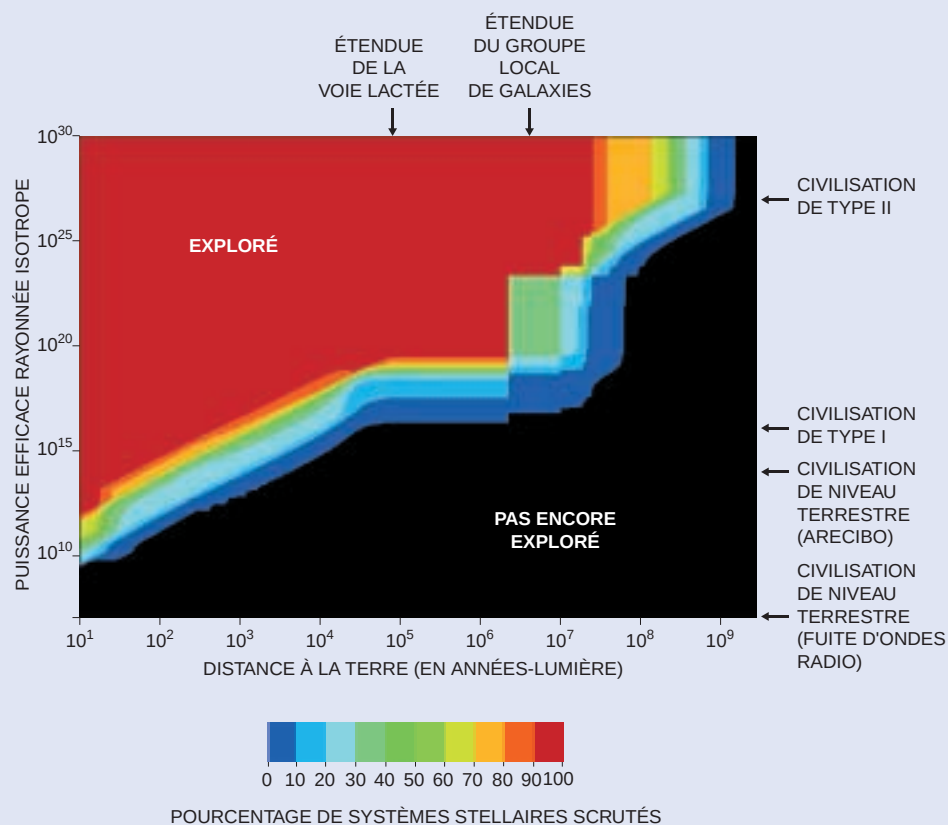
La conséquence est immédiate : la première civilisation dotée de la capacité et de la volonté de coloniser la Galaxie aurait pu le faire avant que d'éventuels concurrents aient la moindre chance de se développer. En principe, un tel événement aurait pu avoir lieu il y a plusieurs milliards d'années, quand les seuls habitants de la Terre étaient des micro-organismes et que la planète était ouverte à toutes les influences extérieures. Pourtant, on n'a relevé aucun artefact physique ni aucune trace chimique ou biologique d'une visite éventuelle de la Terre par des extraterrestres. Même si les germes de la vie ont été délibérément introduits sur Terre, comme l'ont proposé certains, notre planète n'a plus été importunée depuis.

Ainsi, on doit supposer que le comportement des extraterrestres leur a

l'on suppose que la répartition des civilisations est aléatoire dans l'espace, ces résultats limitent également l'espacement moyen des civilisations, et donc leur probabilité de présence dans les zones non explorées de la Galaxie.

En revanche, des millions de civilisations légèrement plus évoluées que la nôtre peuplent peut-être la Voie lactée. Une centaine de civilisations de type I pourraient également partager la Galaxie avec nous. Pour compliquer les choses, les extraterrestres pourraient utiliser une autre fréquence que celle de l'hydrogène, ou émettre par intermittence. Les programmes de recherche de signaux ont enregistré de nombreux «événements non statistiques» : des signaux trop forts pour être du bruit, mais jamais observés à nouveau. Ces signaux ne sont peut-être que des émissions de téléphones portables, mais ils pourraient également correspondre à des émissions extraterrestres intermittentes. Beaucoup reste encore à explorer.

Andrew LEPAGE est physicien à la Société Visidyne, à Burlington, où il analyse des données de télédétection par satellite.



LES RÉSULTATS DES PROGRAMMES de recherche de signaux extraterrestres sont résumés sur ce diagramme. La zone en noir correspond aux civilisations qui auraient pu échapper à nos recherches radio, soit en raison de leur éloignement, soit parce que leurs émetteurs sont trop faibles. Pour comprendre ce diagramme, choisissez une puissance d'émetteur (en ordonnée), déplacez-vous horizontalement jusqu'à la limite de la zone noire, et descendez alors pour lire la distance à la Terre sur l'axe horizontal. Par exemple, un émetteur équivalent à celui d'Arecibo (10^{14} watts) doit être à plus de 4 000 années-lumière pour avoir échappé aux investigations. Les couleurs indiquent la proportion estimée de tous les systèmes stellaires qui ont été inspectés pour une puissance supérieure ou égale à une puissance donnée.

Andrew J. LePage